

## **CARACTERIZACIÓN DEL SUELO RESIDUAL Y SU RELACIÓN EN LA ESTABILIDAD DE TALUDES EN EL ACCESO SUR A CONCEPCIÓN, REGIÓN DEL BIOBÍO, CHILE.**

*D. Sanhueza Monsalve<sup>1</sup>, M. Basso Aránguiz<sup>2</sup> y R. Ponce Abarca<sup>3</sup>*

### **RESUMEN:**

Este artículo presenta la evaluación de la condición de equilibrio límite de dos taludes de suelo residual (T1 y T2) ubicados en los kilómetros 67 y 64 de la autopista Concepción – Cabrero (Ruta 146), respectivamente. Este estudio se realizó a partir de la caracterización integral de diferentes factores que condicionan la estabilidad de los taludes en estudio: precipitaciones, exposición al sol y tipo de vegetación en relación a la orientación de estos, estado de meteorización (Fluorescencia de Rayos X), caracterización petrográfica, análisis de arcillas (Difracción de Rayos X), ensayos geomecánicos y análisis de estabilidad de taludes (Geo – Slope/W). De los resultados se concluye que, aun cuando el grado de meteorización influye directamente en la estabilidad de ambos taludes, T2 posee un comportamiento geomecánico desfavorable debido a la presencia del grupo de arcillas de las esmectitas en el suelo residual. Finalmente, la caracterización integral de T1 y T2, en conjunto con los análisis de estabilidad en términos del Factor de Seguridad, permite concluir que T2 falla cuando la humedad de saturación ( $\omega_{sat}$ ) es alcanzada en un periodo de intensas lluvias.

**PALABRAS CLAVES:** Suelo Residual; Meteorización; Estabilidad de taludes.

### **ABSTRACT:**

This article presents an evaluation of limit balance condition between two slopes of residual soil (T1 and T2), which are located at the kilometres 67 and 64 on the Concepcion – Cabrero highway (Route 146), respectively. This study was made from the complete characterization of the different factors which condition the stability of the slopes in the study: rainfalls, sun exposition and type of vegetation in relation to the orientation of the factors previously mentioned, weathering state (X – Ray Fluorescence), and petrographic characterization, clay analysis (X – Ray Diffraction), geomechanic test and the stability analysis of both of the slopes (Geo – Slope/W). To conclude, according to the results, despite that weathering level directly affects the stability of both slopes, T2 possess an unfavourable geomechanic behaviour, due to the presence of a group of smectite clays in residual soil. Finally, the complete characterization of T1 and T2, in addition with the stability analysis in terms of the Security Factor, allows for the conclusion that T2 fails when the saturation humidity ( $\omega_{sat}$ ) is reached in an intensive rain period.

**KEYWORDS:** Residual soil; Weathering; Slope stability.

---

<sup>1</sup> Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil Geológica, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [dsanhuezam@ing.ucsc.cl](mailto:dsanhuezam@ing.ucsc.cl)

<sup>2</sup> Profesor Guía, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [matildebasso@ucsc.cl](mailto:matildebasso@ucsc.cl)

<sup>3</sup> Profesor Informante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [rponce@ucsc.cl](mailto:rponce@ucsc.cl)

## 1. INTRODUCCIÓN

En Chile, en las últimas décadas se han documentado numerosos Procesos de Remoción en Masa (PRM) que han generado daños en la infraestructura pública y privada, y la pérdida de vidas humanas. Precipitaciones de inusual intensidad vinculadas al fenómeno El Niño durante el invierno de 1997 provocaron flujos de detritos en las regiones III, IV y Metropolitana. La ejecución de cortes en la Carretera Panamericana Sur, realizados en esquistos micáceos superficialmente muy alterados, causó el desarrollo de numerosos deslizamientos del tipo rotacional en la IX, X y XI Región (Hauser, 2000; 1993). En la región del Biobío se han registrado diversos fenómenos de remoción en masa específicamente deslizamientos, asociados a relieves positivos y a periodos de intensas lluvias (López, 2015; López & Garrido 2015). Dependiendo de la magnitud de estos eventos la infraestructura vial regional se ha visto afectada dificultando la conectividad intercomunal (Naranjo, Clavero, Hauser & Ramírez, 2005; Villalobos, 2014).

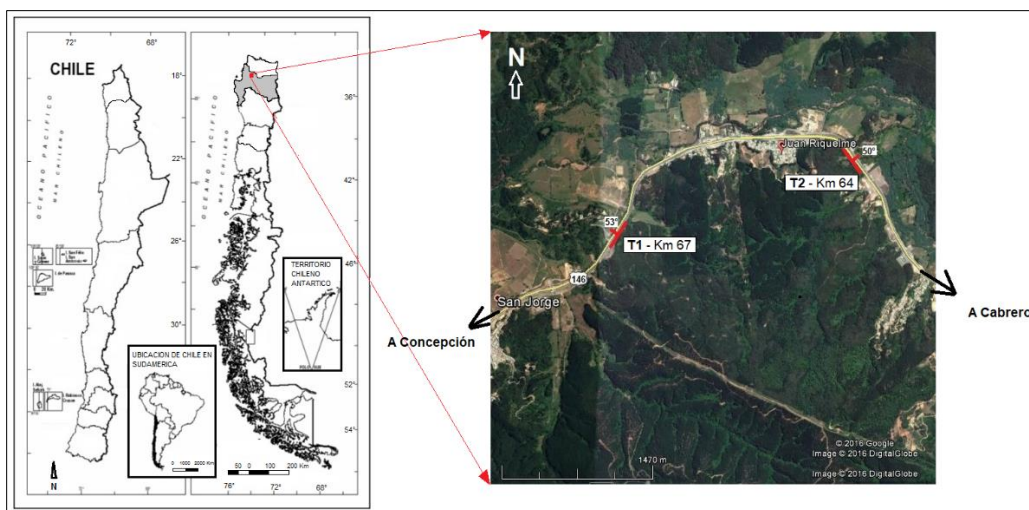
En la ciudad de Concepción, a partir del año 2012 se inició la construcción de la Autopista Concepción – Cabrero (Ruta 146), la cual se emplaza de forma transversal a la Cordillera de la Costa. Los taludes que limitan esta ruta, se han visto afectados por diversos factores como lluvias invernales que potencian la meteorización de las rocas, diferentes tipos de cobertura vegetal, orientación de los taludes, y características geológicas que son parte de un papel clave en la iniciación y generación de deslizamientos.

En este artículo se caracterizan diferentes factores que condicionan la estabilidad en dos taludes ubicados en la ruta a Cabrero (64 y 67 km) a partir del registro de precipitaciones anuales, cantidad de horas de exposición al sol y tipo de vegetación en relación a la orientación de ambos taludes. Se realiza una caracterización petrográfica macroscópica, un análisis de arcillas mediante Difracción de Rayos X y se cuantifica el grado de meteorización (Fluorescencia de Rayos X). Adicionalmente, se llevan a cabo ensayos geomecánicos que posibilitan determinar el Factor de Seguridad (FS), lo que permite establecer la evaluación de estabilidad de T1 y T2.

## 2. ANTECEDENTES GENERALES

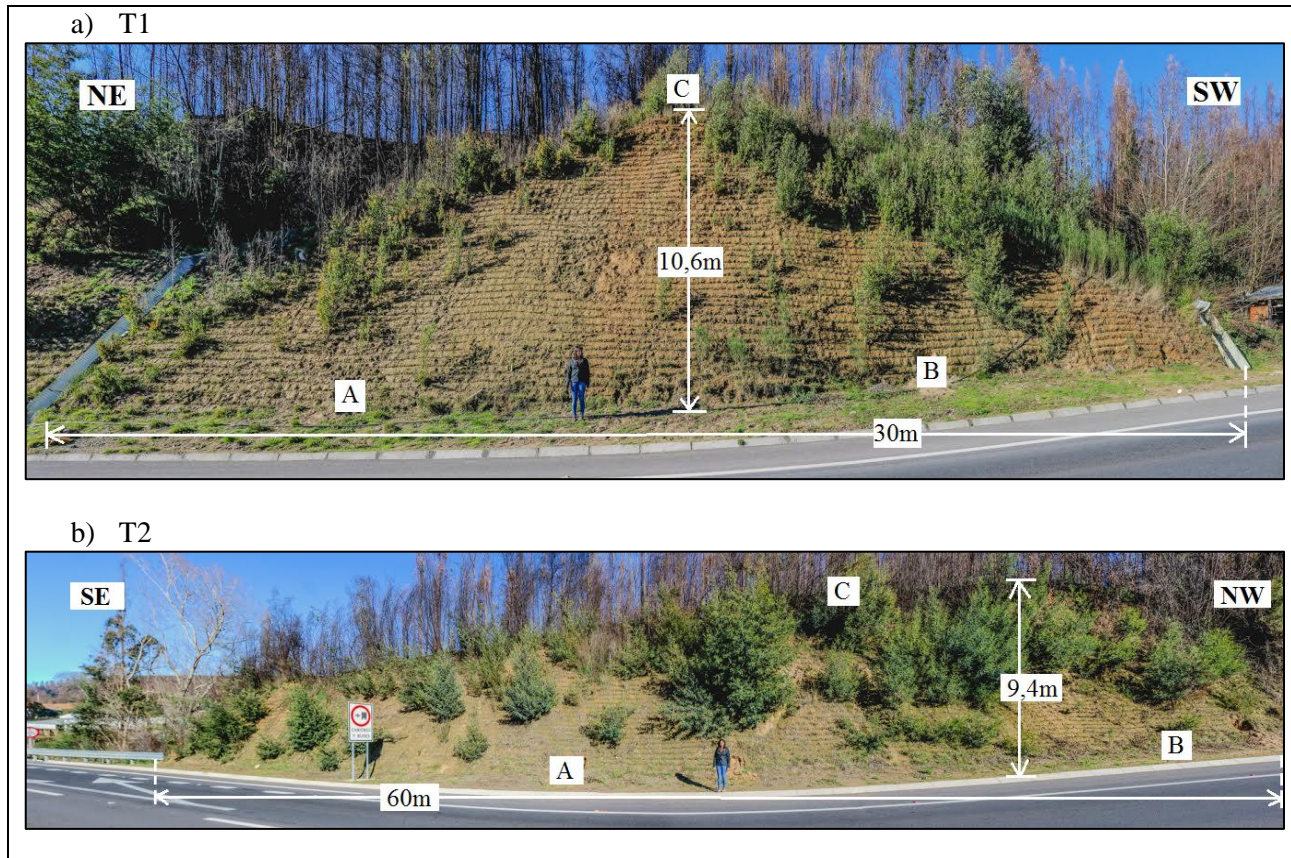
### 2.1 Ubicación del área de estudio

El área de estudio se ubica en el acceso sur de la ciudad de Concepción, específicamente en la Ruta 146, donde se han definido dos taludes a estudiar, correspondiente al Talud 1 (T1) y Talud 2 (T2), ubicados en el kilómetro 67 (Coordenadas: 36°48'30"S 72°58'20"W) y 64 (Coordenadas: 36°48'11"S 72°56'47"W), respectivamente (Figura 1).



**Figura 1:** Ubicación del área de estudio, Ruta 146. Elaboración propia a partir de Google Earth.

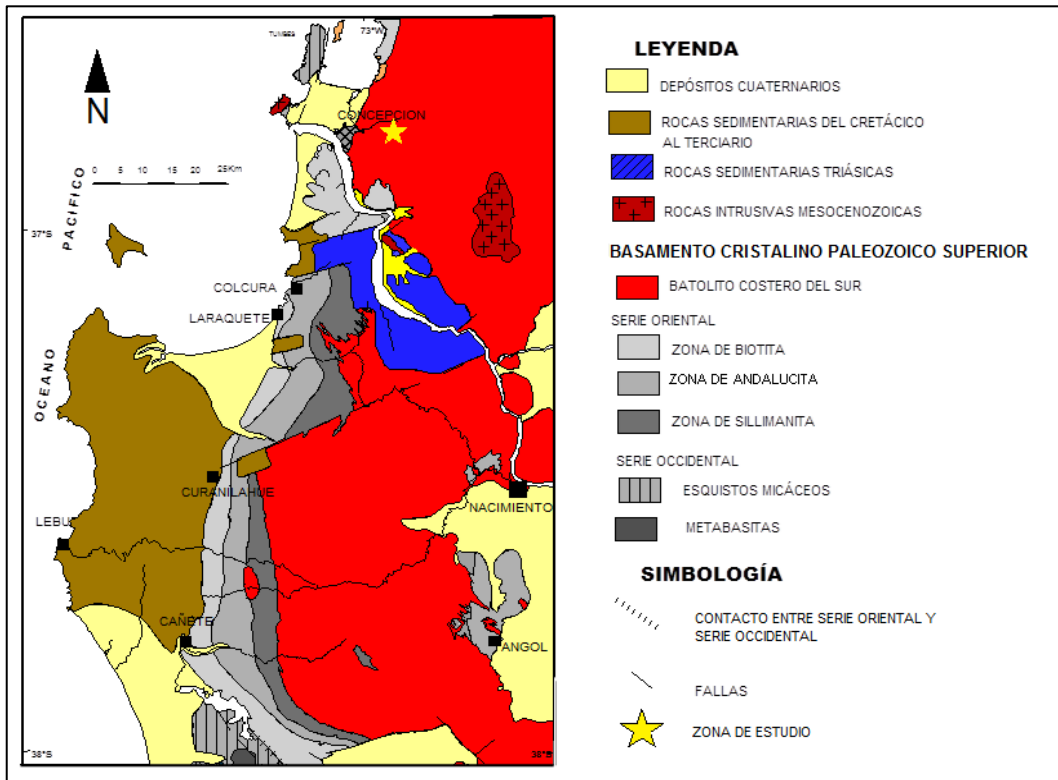
En los taludes objeto de estudio se extrajeron muestras en los meses de marzo a junio, en distintas ubicaciones, tanto en la base como en la zona superior de ambos taludes (A, B y C; Figura 2a y 2b), con el fin de buscar la representatividad de T1 y T2. En la Figura 2, se representan las dimensiones correspondientes a T1 y T2 con alturas promedio que varían de 4 a 10 m y con longitudes de 30 y 60 m, respectivamente.



**Figura 2:** Dimensiones, orientación de taludes y ubicación de muestras extraídas para a) T1 y b) T2.

## 2.2 Geología Regional

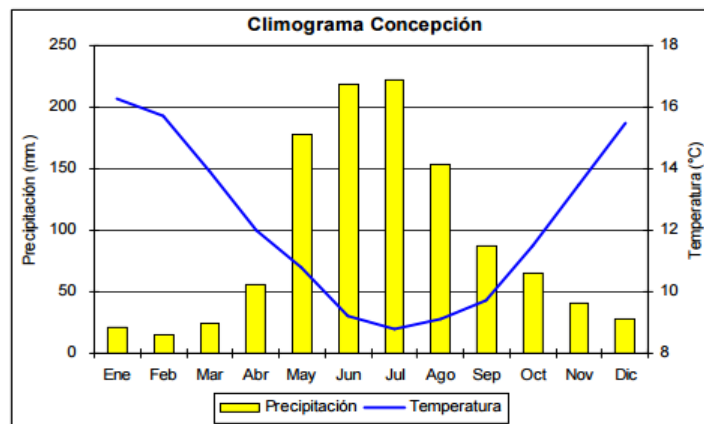
En el área de estudio se destacan rocas graníticas paleozoicas pertenecientes al Batolito Costero del Sur, las cuales afloran a lo largo de la Cordillera de la Costa (Hervé, Munizaga, Parada, Brook, Pankhurst, Snelling & Drake, 1988; Hervé, Munizaga, Montavani & Hervé, 1976; Figura 3). Estas rocas intrusivas corresponden principalmente a tonalitas y granodioritas, y en menor proporción dioritas cuarcíferas y granitos (Hervé *et al.*, 1988; Hervé *et al.*, 1976). Según estudios realizados por el Servicio Nacional de Geología y Minería [SERNAGEOMIN] (2003) estas rocas graníticas corresponderían al periodo Carbonífero-Pérmico con edades que fluctúan entre 328-235 Ma. (Isócronas de Rb – Sr; Hervé *et al.*, 1988; Figura 3).



**Figura 3:** Mapa Geológico de la Cordillera de la Costa. Modificado de Gajardo (1981), Ferraris (1981) y Hervé (1977) in Vásquez (2001).

### 2.3 Clima y Flora

Desde un punto de vista regional, esta es una zona de transición entre el centro y sur del país, con un clima templado cálido, caracterizado por una estación seca de 4 a 5 meses, y con meses lluviosos de mayo a agosto, con temperaturas promedio de 12° C (Figura 4). El régimen térmico es suavizado por la acción moderadora que ejerce el mar, manifestándose en leves amplitudes diarias y anuales (Dirección Meteorológica de Chile: Departamento de Meteorología y Climatología, 2001).



**Figura 4:** Climograma Estación Concepción-Cariel Sur. Extraído de Dirección Meteorológica de Chile: Departamento de Meteorología y Climatología (2001).

Particularmente, los sectores altos y la vertiente occidental de la Cordillera de la Costa, está caracterizada por la desaparición de la estación seca, es decir, se presenta un clima templado húmedo, con humedad constante y precipitaciones que fluctúan entre 1.200 mm y 2.000 mm anuales, con una dirección preferencial de los vientos de norte a sur (Sistema Integrado de Información Territorial [SIIT], 2007; Devynck, 1970).

La vegetación en la Región del Biobío, se ubica dentro de una zona mesomórfica (formas adaptadas a sectores secos y húmedos) e higromórfica (formas adaptadas a la humedad) (División Política Administrativa y Censal, 2007). Particularmente, la Cordillera de la Costa en sus orígenes estaba cubierta de bosques endémicos y nativos, desde la planicie que la rodea hasta sus cumbres, sin embargo, hoy el paisaje está intervenido por efectos antrópicos (Wolodarsky-Franke & Díaz, 2011). La vegetación endémica y nativa de la Cordillera de la Costa ha sufrido una degradación severa, esto debido a la sustitución con plantaciones comerciales de *Pinus radiata* y *Eucalyptus spp.*, los cuales el día de hoy dominan el paisaje (Smith-Ramírez, 2004). Por otra parte, circunstancias como construcción de autopistas, incendios forestales, extracción de leña y la cosecha de especies, tienen consecuencias severas, ya que alrededor del 82% de los suelos de la Cordillera de la Costa, se han clasificado con erosión moderada a severa, debido a la explotación agrícola y forestal, impactando la estabilidad de estos suelos (Carrasco, Millán & Peña, 1993).

### 3. SUELOS RESIDUALES Y ESTABILIDAD DE TALUDES

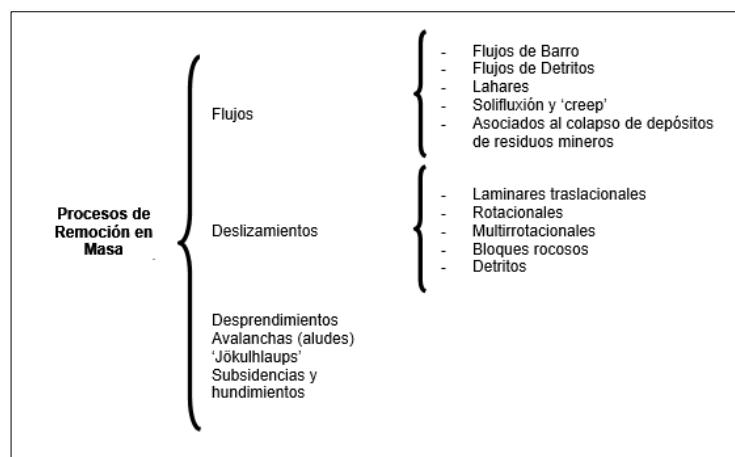
La mecánica de suelos contempla el estudio ingenieril de los suelos, sin embargo, resulta fundamental conocer y entender con anterioridad el origen geológico de estos. En el caso de tratar de obviar inicialmente los estudios geológicos, principalmente en proyectos de mediana a mayor envergadura, se puede correr el riesgo de no considerar características geológicas a mayor escala que incluso condicionen la estabilidad global de las estructuras del proyecto durante o después de su construcción (Villalobos, 2014).

Particularmente, este estudio apunta a los suelos residuales, los cuales se caracterizan por no ser transportados de su localización original, pues tienen la particularidad de originarse de una roca madre, la cual puede ser de origen ígneo, sedimentario o metamórfico (Fookes, 1997). Para la formación de suelo residual, la roca de origen acaba convirtiéndose en suelo a través de la meteorización y descomposición de la roca *in situ*, es decir, actúan procesos físicos y químicos que reducen el macizo rocoso en fragmentos más pequeños, lo que implica la destrucción de la estructura y fábrica de la roca de origen, generando cambios mineralógicos (Fookes, 1997; Blight, 1997).

En Chile, uno de los suelos residuales más comunes y abundantes es conocido como *maicillo* (Villalobos, 2014). Específicamente en la franja de la Cordillera de la Costa de la Región del Biobío, existe un importante desarrollo de este suelo a partir de intensos procesos de meteorización física y química que afectan las rocas granodioríticas y tonalíticas pertenecientes al Batolito Costero del Sur (Hervé *et al.*, 1988; Hervé *et al.*, 1976; Villalobos, 2014). Adicionalmente, desde un punto de vista ingenieril la meteorización física y química modifica las propiedades mecánicas de los suelos, disminuyendo la resistencia al corte en taludes, lo que implica la ocurrencia de PRM en materiales fuertemente meteorizados (Moon & Jayawardane, 2004). Como consecuencia de esto, comienzan a actuar los procesos erosivos, los cuales desgastan la roca y transportan aquellas partículas más susceptibles al arrastre, producto de procesos geológicos exógenos, como son el agua, hielo glaciar y viento (Solé, Cantón, Lázaro & Puigdefábregas, 2009). Esta acción de traslado de partículas de suelo, en conjunto con los diferentes procesos de meteorización, es una de las causas más comunes de inestabilidad de taludes (Suarez, 1998). Por esta razón, es fundamental el control de procesos erosivos y de estabilidad a través de diferentes soluciones. En este sentido, la vegetación se utiliza como elemento de protección y conservación del suelo, tanto en superficie, protegiendo y sosteniendo el suelo, a través de vegetación del tipo herbácea, como en profundidad, aumentando la resistencia y cohesión, además de alcanzar un control del nivel de humedad y capacidad de retención de agua, a través de vegetación del tipo arbustiva (Castro & Carramiñana, 2010).

La vegetación es influenciada por la cantidad de energía en forma de radiación solar que llega a un punto de la superficie terrestre, por lo tanto, estará relacionada a la orientación de los taludes en estudio. De lo antedicho se desprenden dos conceptos: solana y umbría. Por esta razón, las laderas de solana ofrecen una mayor termicidad y una menor humedad que las de umbría, lo que influye a que la vegetación prefiera normalmente las zonas de umbría (Delgado & Godoy, 2009).

En base a lo anterior, los procesos de movilización de suelo y/o roca, conocidos como Procesos de Remoción en Masa (PRM) son generados por factores tales como: litología, estado tenso – deformativos, factores climáticos, vegetación, entre otros (Hauser, 2000; 1993). Existen variadas clasificaciones para estos fenómenos (Alonso, 1986; Corominas & Alonso, 1984; Müller, 1979; Varnes, 1978; Terzaghi & Peck, 1973; Skempton & Hutchinson, 1969; Hutchinson, 1968; García Yague, 1967; Macau, 1963; Highway Research Borad, 1958), sin embargo, en este trabajo se ha utilizado una clasificación simplificada que agrupa la totalidad de los PRM en Chile (Figura 5; Hauser, 2000; 1993).



**Figura 5:** Clasificación de los PRM (Hauser, 2000; 1993)

En Concepción, son recurrentes los PRM asociados a periodos de intensas lluvias, específicamente deslizamientos. Por una parte, Alarcón (1995) contabiliza 88 eventos para el periodo 1960-90, y por otro, Mardones & Rojas (2012) reconocen como detonante principal, de estos procesos, la intensidad de precipitaciones diarias, como también otros factores que han facilitado su desarrollo: taludes deforestados, taludes intervenidos para construcción de casas o carreteras (sin estabilizar), pendientes topográficas  $> 20^\circ$ , taludes enmantados por gruesas capas de regolita conteniendo arcillas del tipo esmectita, entre otros.

A continuación en la Tabla 1 resume los deslizamientos ocurridos entre junio y agosto de 1997, en comunas alrededor de Concepción (Villalobos, 2014), mostrando evidencias de los daños asociados a estos fenómenos.

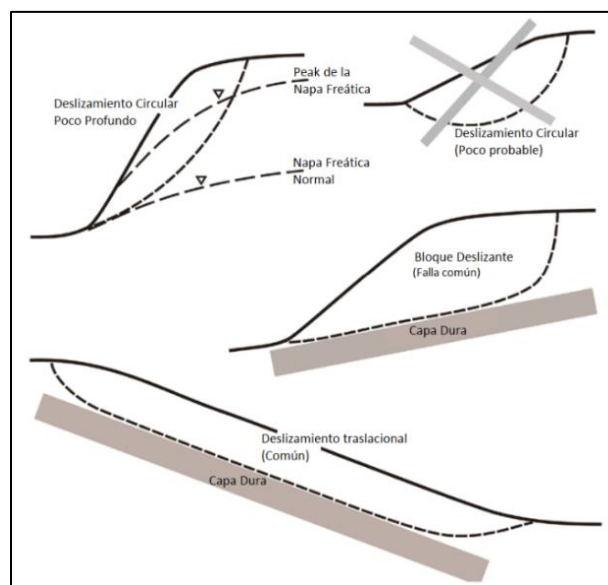
**Tabla 1:** Deslizamientos ocurridos entre junio y agosto de 1997 (Villalobos, 2014)

Fecha	Comuna	Sector	Descripción
12/06	Tomé	Cerro Alegre Vicente Palacios	60% de casas destruidas, 16 casas anegadas con barro
16/06	Concepción	Calle M. Concha	Anegamiento con barro
18/06	Concepción	Valle Nonguén Villuco Pedro de Valdivia 195	2 casas en peligro por derrumbe Camino cortado por deslizamiento Flujo de barro sobre el camino
20/06	Chiguayante	Villa San Marcos Papen 1, 2, La Rivera	Derrumbes rodean las calles
21/06 22/06	Chiguayante	Valle del Sol	Talud de 40 m cae sobre patios Habitantes Evacuados

24/06	Tomé	Cocholgüe	Derrumbe de cerro sobre 5 casas
25/06	Concepción	Palomares	Barro cubre calle nueva
07/07	Concepción	Pedro de Valdivia 195	Flujo de barro afecta 2 casas
28/07	Concepción	Pedro de Valdivia 195	Barro corta tránsito
29/07	Concepción	Agüita de la Perdiz	Deslizamiento sobre 5 casas
30/07	Concepción	Cerro la Polvora Agüita de la Perdiz Palomares Borde del Río Biobío	12 derrumbes es distintos puntos, un muerto 40 albergados, cortes de tránsito Línea férrea bajo el agua por falla de terraplen
	Hualqui		
02/08	Talcahuano	Denavi Sur	Derrumbe sobre 3 casas
	Concepción	Agüita de la Perdiz Cerro la Polvora Palomares, P. de V. 195	Deslizamiento de taludes con barro
16/08	Concepción	Agüita de la Perdiz	Derrumbe arrastra 2 casas
	San Pedro de la Paz	Camino a Santa Juana	Deslizamiento bota árbol sobre camión en marcha
17/08	Concepción	Agüita de la Perdiz Cerro la Polvora P. de V. 195, Geswein Colegio Concepción	Peligro de derrumbe debido a terreno reblandecido Derrumbes sobre camino a Chiguayante
	Talcahuano	Puente Perales Cerro La Gloria	Derrumbe sobre Colón Derrumbe destruye casa

Es importante mencionar que periodos muy lluviosos en comunas alrededor de Concepción, como una precipitación diaria de 80 mm y/o la acumulación de lluvias en tres días consecutivos sobre los 100 mm, tiene como consecuencia grandes problemas de estabilidad y el resultado de numerosos deslizamientos (Naranjo, Clavero, Hauser & Ramírez, 2005).

Los modos de falla en deslizamientos rotacionales y multirrotacionales, pueden ser roturas profundas o superficiales a través de superficies curvas que pueden ser o no circulares (Ferrer, 1987), como también en deslizamientos ‘laminares traslacionales’, ‘de bloques rocosos’ y ‘de detritos’, con las superficies de falla planar, las cuales son desencadenadas a partir de planos de debilidad (Varnes, 1978; García Yague, 1967). En particular, los modos de falla en suelos residuales, en taludes con pendientes pronunciadas, son generalmente planares, siendo poco probable que correspondan a fallas circulares profundas (Figura 6; Wesley, 2011).



**Figura 6:** Modos de falla en suelos residuales. Modificado de Wesley (2011).

Cabe destacar que la mayoría de los deslizamientos en suelos residuales son poco profundos y rápidos, ya sea sobre el saprolito, roca algo meteorizada o roca intacta. Sin embargo, cuando los perfiles de meteorización del suelo residual son muy profundos, se pueden presentar también deslizamientos rotacionales (Suárez, 1998).

#### 4. METODOLOGÍA

Existen diversas causas para los deslizamientos en taludes, los cuales son controlados por: (1) Factores Condicionantes, los cuales modifican las fuerzas internas y externas que actúan sobre el terreno, que dependen de la naturaleza, estructura y forma del suelo y (2) Factores Desencadenantes, que corresponden a agentes externos que provocan inestabilidades y son responsables de la magnitud y velocidad de los movimientos (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño & Oteo, 2002). Considerando lo anterior, se realizó una caracterización integral del suelo residual de ambos taludes estudiados, que incorporó estudios de agentes externos, litología, grado de meteorización, mineralogía, microestructura y propiedades mecánicas, los cuales permitieron establecer los horizontes más susceptibles a deslizar. En la Tabla 2 se muestra un resumen de los elementos, características y procedimientos de análisis.

**Tabla 2:** Metodología para la caracterización integral de un suelo.

Elementos	Factores a caracterizar	Procedimiento
Agentes externos	Vegetación como factor antrópico, precipitación y exposición al sol	Método de conteo de especies vegetales, análisis visual e investigación bibliográfica
Estado de meteorización	Grado meteorización	Fluorescencia de rayos X (Equipo marca Rigaku, modelo ZSX Primus II en Instituto Geología Económica Aplicada de la Universidad de Concepción)
Litología	Minerales presentes, textura, tamaño de granos y tipo de roca original	Clasificación composicional mediante descripción macroscópica (Microscopio estereoscópico marca Leica, modelo EZ4 HD en Laboratorio de Geología Universidad Católica de la Santísima Concepción)
Mineralogía de arcillas	Minerales resultantes del proceso de meteorización (tipos de arcilla)	Difracción de Rayos X (Equipo marca Bruker, modelo D4 ENDEAVOR en Instituto Geología Económica Aplicada de la Universidad de Concepción)
Propiedades Mecánicas	Contenido de humedad, granulometría, límites de consistencia, gravedad específica, clasificación USCS, densidad <i>in situ</i> (Cono de arena) y resistencia a corte (Corte Directo)	Ensayos geomecánicos (Laboratorio de Geomateriales de la Universidad Católica de la Santísima Concepción) ⇔ Cono de arena tipo A y Caja de Corte Directo marca Controls, modelo 27 – T0225/A

##### 4.1 Vegetación

La caracterización de las comunidades vegetales en los taludes en estudio, se basó en la identificación de Especies Vegetales (SP), las cuales pueden ser autóctonas (nativas o endémicas) y/o alóctonas (introducidas). El porcentaje de cobertura vegetal (%CV) sobre T1 y T2, se evaluó según criterios de dominancia y taxonomía, y consideró las SP que se encuentran en el área de la pendiente de T1 y T2, las cuales corresponden al tipo biológico leñoso bajo (LB; arbustos). Estas SP fueron clasificadas según su altura, las cuales varían desde: 1 – 25 cm, 25 – 50 cm y de 50 – 100 cm (Iturriaga & De la Harpe, 2012). Por otra parte, el %CV, se calculó a partir del conteo del número de especies (N) en un área (A) determinada, haciendo uso de la siguiente ecuación (Matteucci, & Colma, 1982):

$$\%C.V = \frac{N}{A} \quad (1)$$

Con los datos anteriores, es posible establecer una solución al control de la erosión y de la estabilidad de los taludes, mediante la colonización de SP nativas o endémicas en los taludes en estudio, para lo cual es necesario considerar una serie de requerimientos y características, tales como: exigencias climáticas, exigencias edáficas, exigencias hídricas, morfología, regeneración, agresividad y dominancia, y la capacidad de recuperación de suelos (Castro & Carramiñana, 2010).

## 4.2 Estado de meteorización

La meteorización de los suelos se determinó mediante el análisis de los óxidos totales en muestras de los taludes en estudio, los cuales fueron cuantificados por Fluorescencia de Rayos X (FRX). Mediante el análisis de óxidos totales, se determinó como medida del grado de meteorización el Índice Químico de Alteración (Chemical Index Alteration [CIA]; Zarza, 2010), basados en la proporción molecular:

$$CIA = \left( \frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O} \right) * 100 \quad (2)$$

Con los resultados del CIA para ambos taludes y su integración en el diagrama ternario A-CN-K (Chesworth, 2000; 1979) se evaluó el grado de meteorización química. De este modo altos valores de CIA reflejan la pérdida de elementos móviles relativos a los constituyentes residuales estables durante la meteorización, y bajos valores de CIA indican la ausencia de alteración química. Los valores de CIA para rocas frescas y minerales son consistentemente cercanos a 50%. Las muestras con valores de CIA inferiores a 60% indican una roca fresca o ligeramente meteorizada, valores entre 60% y 80% indican una roca meteorizada y valores de más de 80%, un suelo residual (Aristizábal, Roser & Yokota, 2009; Fedo, Nesbitt & Young, 1995).

## 4.3 Mineralogía de arcillas

Mediante la Difracción de Rayos X (DRX) con análisis de arcillas, se determinaron los minerales de arcilla de interés geotécnico para cada una de las muestras de los taludes en estudio, a partir de los difractogramas y de esta forma establecer una composición mineralógica cualitativa, donde el proceso de identificación y caracterización de grupos y especies está basado en Moore & Reynolds (1997) y Villalobos (2014). Finalmente, el estudio comparativo de estos difractogramas, permite determinar con exactitud la composición mineralógica de los filosilicatos presentes (Caolines, Esmeclitas, Micas y Cloritas).

## 4.4 Propiedades mecánicas

Para caracterizar el suelo residual y conocer la condición de equilibrio límite de los taludes en estudio, se realizaron diversos ensayos geomecánicos regidos por diferentes normas (Tabla 3).

**Tabla 3:** Resumen de ensayos geomecánicos y normas correspondientes.

Tipo de Ensayo	Norma
Contenido de humedad	Cálculo de humedad, mediante norma chilena NCh-1515 Of. 1997.
Granulometría	Tamaño de partículas, mediante el Manual de Carreteras de la Dirección de Viabilidad (2015).
Límites de Atterberg	Límite Líquido (LL), norma chilena NCh-1517/1 Of. 1979. Límite Plástico (LP), norma chilena NCh-1517/2 Of. 1979.
Gravedad Específica	Cálculo de la Gravedad Específica, norma chilena NCh-1532 Of.1980.
Clasificación USCS	Tipo de suelo, a través del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS) ASTM D 2487-11.
Cono de Arena	Cálculo de densidad <i>in situ</i> , Norma Chilena NCh-1516, 1979.
Corte Directo	Cálculo de resistencia al corte y ángulo de fricción, norma ASTM D3080/D3080M-11.

## 4.5 Análisis de estabilidad de taludes (Geo – Slope /W, Student Edition)

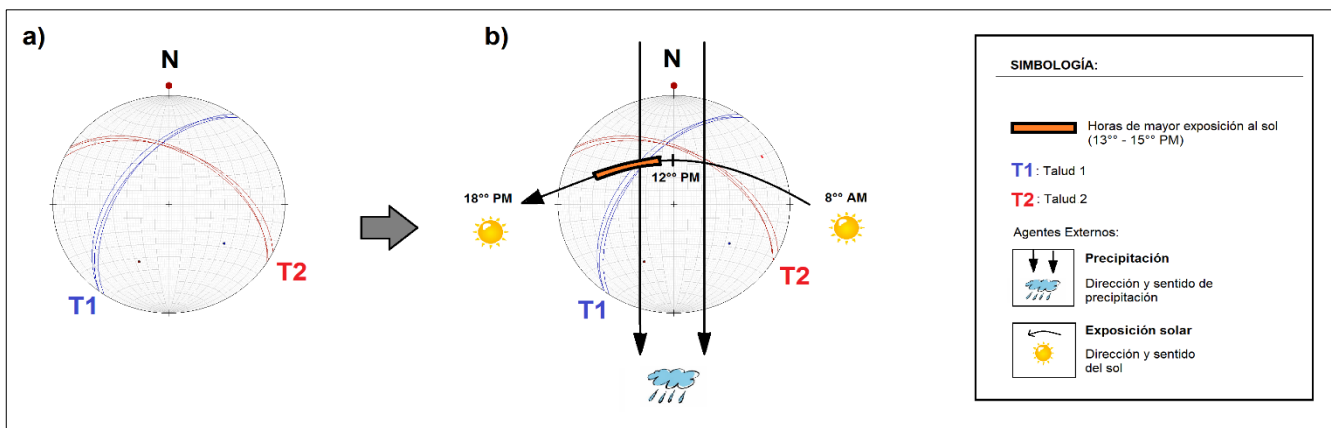
El análisis de la estabilidad de taludes estudiados, se realizó mediante el software Geo – Slope/W (Geo-Slope International Ltd., 2016), el cual se basa principalmente, en el uso del método de equilibrio límite (Janbu, 1954), el permite modelar suelos homogéneos y estratificados, con superficies geométricas complejas y con presencia de nivel freático (Sanhueza & Rodríguez, 2013). El análisis se realizó a partir del Modelo de Janbu, con una distribución de 30 dovelas dentro de la masa deslizante, la cual es caracterizada por medio de los resultados de

los parámetros geomecánicos, modelando bajo el criterio de Mohr – Coulomb para el comportamiento de los materiales, permitiendo reconocer las distintas superficies de rotura, la superficie de falla más desfavorable, la distribución de las dovelas consideradas dentro de la masa deslizante y los diagramas de cuerpo libre para cada una de las dovelas dentro de la a superficie de falla estudiada (Sanhueza & Rodríguez, 2013).

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Agentes externos

En cuanto a los agentes externos considerados en la zona de estudio, se encuentran las precipitaciones, exposición al sol y vegetación como principal factor antrópico, los cuales influyen en la generación de PRM. Los efectos generados por los agentes externos sobre T1 y T2 están relacionados con la orientación perpendicular entre ellos, donde el rumbo y manteo de T1 y T2, corresponde a N34E/53NW y N60W/50NE, respectivamente (Figura 7a). Es preciso señalar, que a pesar de la orientación de T1 y T2, estos se ven afectados por la precipitación de manera equivalente (Figura 7b). No obstante, es un agente externo primordial, ya que intensas precipitaciones tienen como consecuencias grandes problemas de estabilidad y el resultado de numerosos deslizamientos. Por otra parte, en la Figura 7b, se muestra la relación entre la orientación de T1 y T2 con la exposición solar (dirección y sentido del sol), la cual tiene su máxima intensidad entre las 13:00 y 15:00 horas. De esta forma, T1 presenta mayor exposición al sol (solana) que T2 (umbría).



**Figura 7:** a) Representación estereográfica para los planos de las superficies de T1 y T2 y b) Relación de la orientación de T1 y T2, con los agentes externos. Elaboración propia a partir de <http://app.visiblegeology.com/stereonetApp.html>.

Respecto a la vegetación, que aflora en el área de la pendiente de T1 y T2, se reconocen especies arbustivas alóctonas (*Genista monspessulana*, *Aromo Australiano* y *Aromo Chileno*) y una especie herbácea alóctona *Gramineae Poaceae*. En la Tabla 4 se presentan los resultados de la caracterización de las SP arbustivas presentes en T1 y T2, a partir de la cual se establece una relación entre la orientación de estos, su grado de exposición al sol y el porcentaje de cobertura vegetal (%CV). De este modo, T2 tiene un %CV de un 26% debido a que se encuentra bajo condiciones ambientales de umbría, las cuales son propicias para el crecimiento de la vegetación. En cambio, T1 por encontrarse en solana, posee un %CV menor.

**Tabla 4:** Caracterización de especies vegetales arbustivas presentes en T1 y T2.

Talud	Orientación	Especies Vegetales (SP)	Altura (cm)	Número de Especies (N)	Área (A, m <sup>2</sup> )	Cobertura Vegetal (%CV)
T1	N34E/53NW	<i>Genista monspessulana</i>	50-100	55	456,6	12%
		<i>Aromo Australiano</i>	25-50	45		9%

		<i>Aromo Chilensis</i>	0-25	14		1%
		<b>TOTAL</b>		<b>114</b>	<b>TOTAL</b>	<b>22%</b>
T2	N60W/50NE	<i>Genista monspessulana</i>	50-100	68	674,0	10%
		<i>Aromo Australiano</i>	25-50	82		12%
		<i>Aromo Chilensis</i>	0-25	23		3%
		<b>TOTAL</b>		<b>173</b>		<b>TOTAL</b>

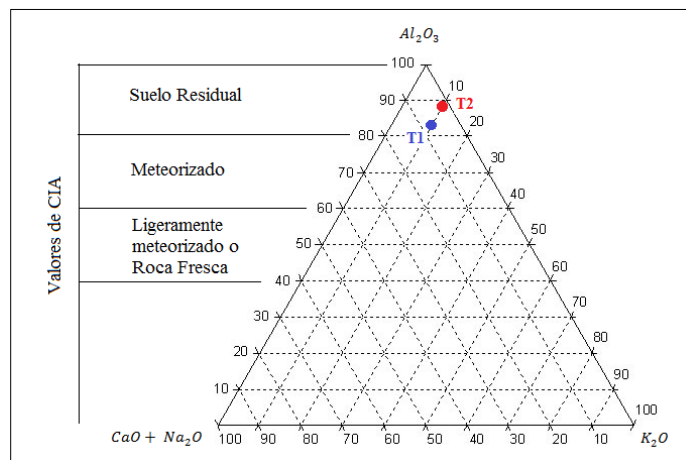
En coherencia con lo anterior, y a partir de una estimación visual, la especie herbácea alóctona *Gramineae Poaceae* tiene una mayor presencia en T2 que en T1, dada las condiciones ambientales ya descritas.

Es necesario destacar que la vegetación es utilizada como elemento de protección y conservación del suelo, tanto en superficie, protegiendo y sosteniéndolo (vegetación herbácea), como en profundidad, aumentando su resistencia y cohesión (vegetación arbustiva). Sin embargo, se debe priorizar el uso de la vegetación autóctona (nativa o endémica) para la colonización de taludes (Castro & Carramiñana, 2010).

Dado que en la zona de estudio predomina vegetación alóctona, se sugiere como solución para el control de la erosión y de la estabilidad de los taludes, de la autopista Concepción – Cabrero (Ruta 146), la introducción de algunas especies autóctonas con posibilidades de adaptación y viabilidad en T1 y T2, que sean de rápido crecimiento y con buenas características para la colonización de dichas superficies. Por una parte, se recomiendan especies arbustivas autóctonas (*Baccharis spp.* y *Aristotelia chilensis*), cuyas alturas no modifican las condiciones de equilibrio de estos, asegurando la estabilidad geotécnica a través del tiempo. Por otra parte, para el control de la erosión superficial, se sugiere el uso de vegetación del tipo herbáceas autóctonas como *Alstroemeria aurea*, *Acaena argentea*, *Acaena ovalifolia* y *Stipa laevissima*.

## 5.2 Estado de meteorización

A partir de los ensayos de FRX, realizados en muestras en T1 y T2, se puede concluir que T2 presenta un mayor grado de meteorización con un índice químico de alteración (Chemical Index Alteration [CIA]) de 89%, mientras que T1 registra un CIA = 84,6%, lo que implica que T2 es más inestable que T1. Sin embargo, según el diagrama ternario A-CN-K, ambos taludes son clasificados como suelo residual (Figura 8), lo que conlleva que las propiedades mecánicas de la roca original han sido modificadas, reduciendo totalmente las tensiones de corte de ambos taludes.

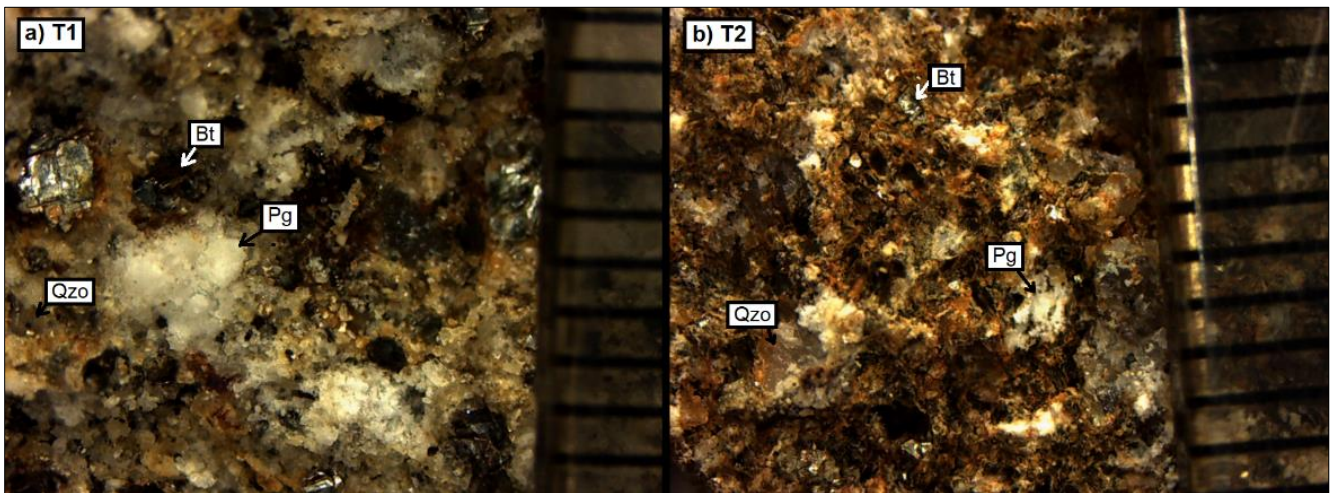


**Figura 8:** Diagrama ternario A-CN-K (Nesbit & Young, 1989; 1984), para valores de CIA de T1 y T2.

En suma, el impacto de los agentes externos incrementa el efecto de los procesos erosivos derivados de la intensa descomposición de T1 y T2. En específico, las fuertes precipitaciones registradas en la Cordillera de la Costa (1.200 y 2.000 mm anuales) contribuyen con el transporte de las partículas y desgaste de la roca (actual suelo residual), modificando la condición de equilibrio de ambos taludes en estudio, lo que implica establecer soluciones para el control de erosión y estabilidad de taludes, a través de la colonización de vegetación autóctona.

### 5.3 Litología

Respecto a la litología y microestructura, todas las muestras correspondientes a T1 y T2 tienen su origen en una roca ígnea plutónica, las cuales presentan minerales secundarios arcillosos producto de la intensa meteorización. Desde un punto de vista textural, los taludes en estudio corresponden originalmente a rocas holocristalinas, faneríticas e inequigranulares, de estructura masiva (Figura 9). Composicionalmente están constituidas por minerales de cuarzo (15 a 25%), plagioclasas (25 a 35%) y biotita (10 a 20%), tamaño arena, y en menor proporción caolín, limolita y arcillas indiferenciadas, tamaño limo/arcilla. Según la clasificación composicional de Streckeisen (1976) la roca que aflora en T1 y T2 corresponde a tonalita.



**Figura 9:** Se observan rocas ígneas inequigranulares con presencia de cuarzo (Qzo), plagioclase (Pg) y biotita (Bt) en escala milimétrica, donde a) Talud 1 y b) Talud 2.

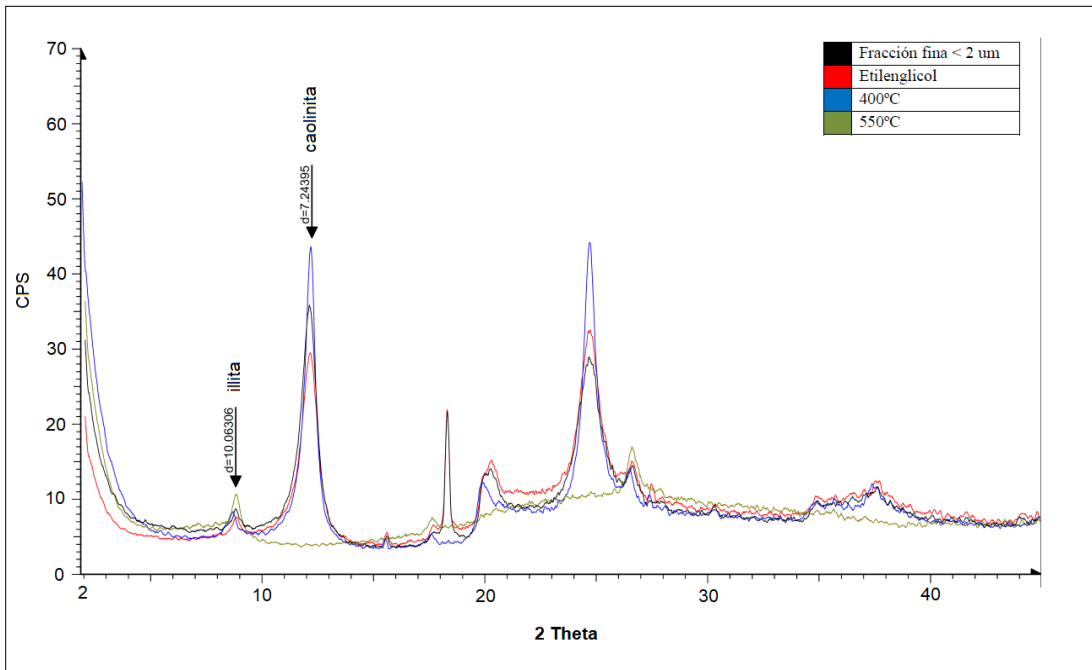
### 5.4 Mineralogía de arcillas

Los análisis mineralógicos de Difracción de Rayos X (DRX) realizados a la fracción fina ( $< 2 \mu\text{m}$ ) arrojaron la presencia de minerales del grupo del caolín, micas del tipo illita y esmectitas. En la Tabla 5 se presentan los resultados analíticos del análisis de arcillas realizado en ambos taludes, donde se evidencia la existencia de una u otra especie mineral en función de su reacción ante el proceso de solvatación por etilenglicol y posteriores tratamientos térmicos ( $400^\circ\text{C}$  y  $550^\circ\text{C}$ ). De esta forma, T1 presenta caolinita y mica del tipo illita, determinados por las variaciones en los pick 7.24 y 10.06, respectivamente (Figura 10). Por otra parte, T2 presenta caolinita, mica del tipo illita y esmectita, determinados por las variaciones en los pick 7.24, 10.06 y 14.61 (Figura 11).

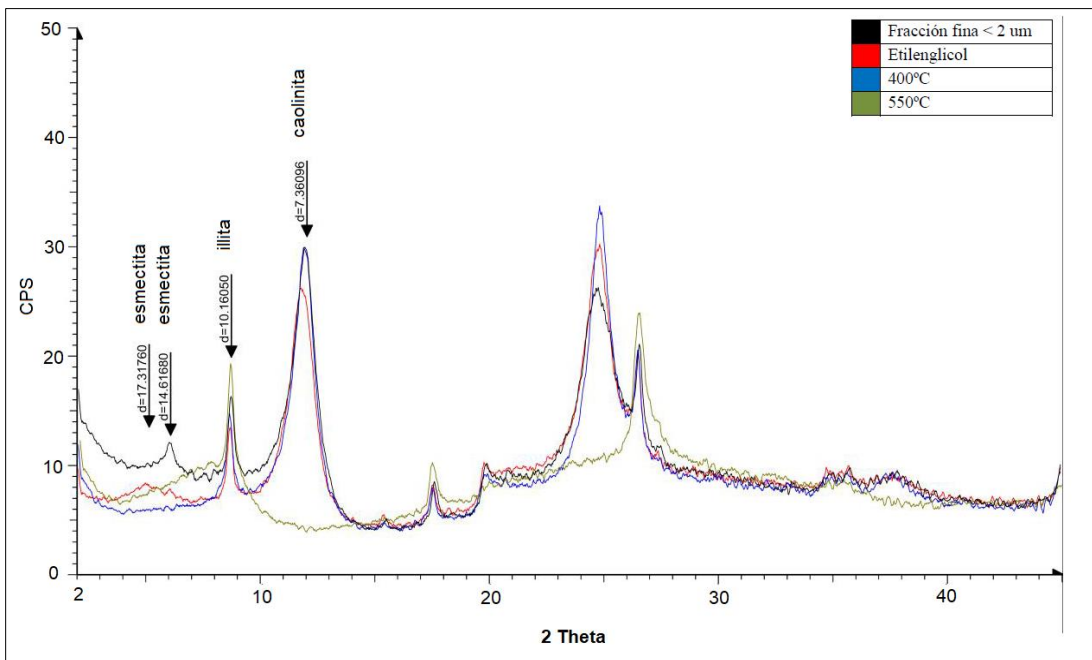
**Tabla 5:** Determinación de la especie mineral, según su tratamiento.

Talud	Diámetro Fino (d; Å)	Etilenglicol	400° C	550° C	Grupo	d 060	Especie
1	7,24	Sin cambio simétrico	incremento	colapso	Caolín	N/A	Caolinita
	10,06	Sin Cambio	Sin Cambio	Sin Cambio	Micas	1,499	Illita

2	7,36	Sin cambio simétrico	Incremento	Colapso	Caolín	N/A	Caolinita
	10,16	Sin Cambio	Sin Cambio	Sin Cambio	Micas	1,599	Illita
	14,61	Desplaza a 17,32	Colapso	Sin Cambio	Esmectitas	N/A	Sin determinar



**Figura 10:** Espectrómetros superpuestos, indican la presencia de caolín e illita en las muestras de T1.



**Figura 11:** Espectrómetros superpuestos, indican la presencia de caolín, illita y esmectita en las muestras de T2.

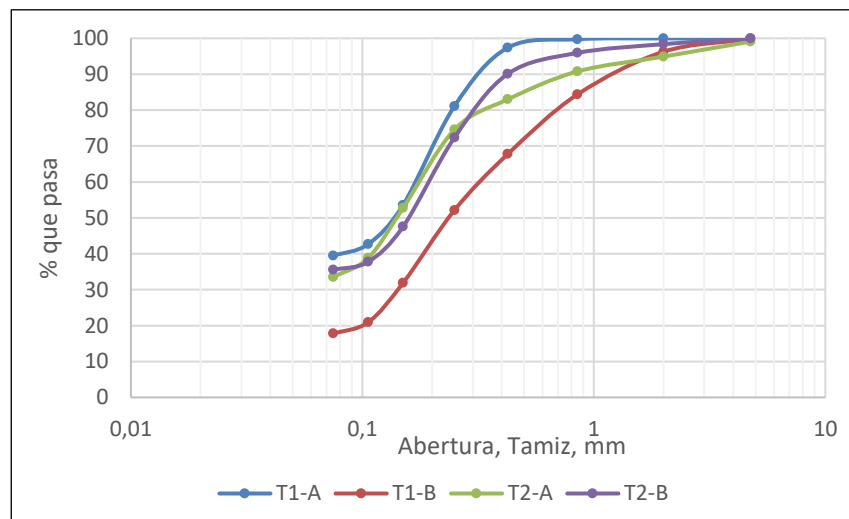
Considerando lo anterior, se puede concluir que T1 tiene un comportamiento mecánicamente más favorable ante la presencia de agua, lo que lo hace un talud más estable, esto debido a la presencia de minerales de arcilla de caolinita y mica del tipo illita. Los minerales de arcilla de caolinita, poseen baja capacidad de contracción e hinchamiento, pues las uniones entre capas son relativamente fuertes. Por otra parte, los minerales de arcilla micáceos del tipo illita, están constituidos internamente por cationes de potasio pobremente hidratados, los cuales impiden el hinchamiento, dado que reducen el área expuesta al agua.

En contraste, T2 es mecánicamente inestable a la acción del agua, esto debido a la presencia de minerales de arcilla de esmectita. Las esmectitas, por su estructura química, están formadas por una lámina alumínica entre dos sílicios, superponiéndose así secuencialmente, con una unión de retículas débil, por lo que las moléculas de agua pueden introducirse en la estructura con cierta facilidad, resultando fácil el hinchamiento, lo que se traduce en la formación de arcillas expansivas.

## 5.5 Propiedades mecánicas

### 5.5.1 Clasificación USCS

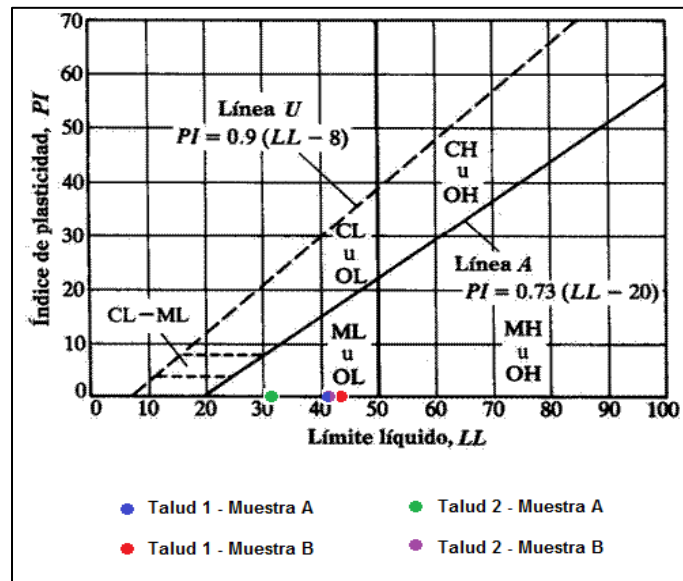
Desde el punto de vista granulométrico, el tamaño de los granos se relaciona directamente con la resistencia mecánica y comportamiento hidráulico del suelo, es decir, a medida que el tamaño de los granos aumenta, es mayor la resistencia mecánica y la capacidad de conducir agua a través de los espacios intersticiales (Villalobos, 2014). Las curvas granulométricas para T1 y T2, representan suelos residuales arenosos, cuyos tamaños varían desde una fracción media (2 mm) a fina (0,075 mm). En baja proporción (< 1%) se reconocieron granos con un tamaño máximo de 4,75 mm. Adicionalmente, el porcentaje de suelos finos bajo la malla No 200 en T1 y T2 varía entre 17% - 38% y 32% - 35%, respectivamente, lo que permite deducir que ambos taludes poseen granulometrías muy similares (Figura 12).



**Figura 12:** Granulometría para T1 y T2, respecto a sus muestras A y B.

Los límites de Atterberg, son considerados como los puntos de transición del suelo en relación a su contenido de humedad, es decir, el suelo posee un estado sólido cuando está seco y a medida que se incrementa el contenido de agua, este va pasando sucesivamente a estados semi – sólido, plástico y líquido. Luego, de los resultados obtenidos en laboratorio, T1 y T2 poseen un comportamiento no plástico, es decir, el suelo residual en ambos casos, no fueron capaces de soportar deformación sin romperse. Lo anterior, se respalda a partir de los resultados granulométricos, pues el porcentaje de finos no es suficiente como para que T1 y T2 obtenga un comportamiento plástico (Índice de Plasticidad igual a cero; PI, Figura 13). Por otra parte, ambos taludes en estudio presentaron

límite líquido (LL), donde el LL en T1 varía entre un 42% y 43%, y T2 entre un 31% y 42% (Figura 13), lo que implica que si ambos taludes alcanzan esta humedad, el suelo residual se comportaría como un líquido.



**Figura 13:** Gráfica de Plasticidad USCS de las muestras en T1 y T2.

A partir del Sistema de Clasificación de Suelos USCS, y en relación a los resultados geomecánicos obtenidos, ambos taludes corresponden a suelos finos no plásticos, simbolizados como SM, lo que corresponde a arenas limosas, por ende, mezclas de arena y limo mal graduadas.

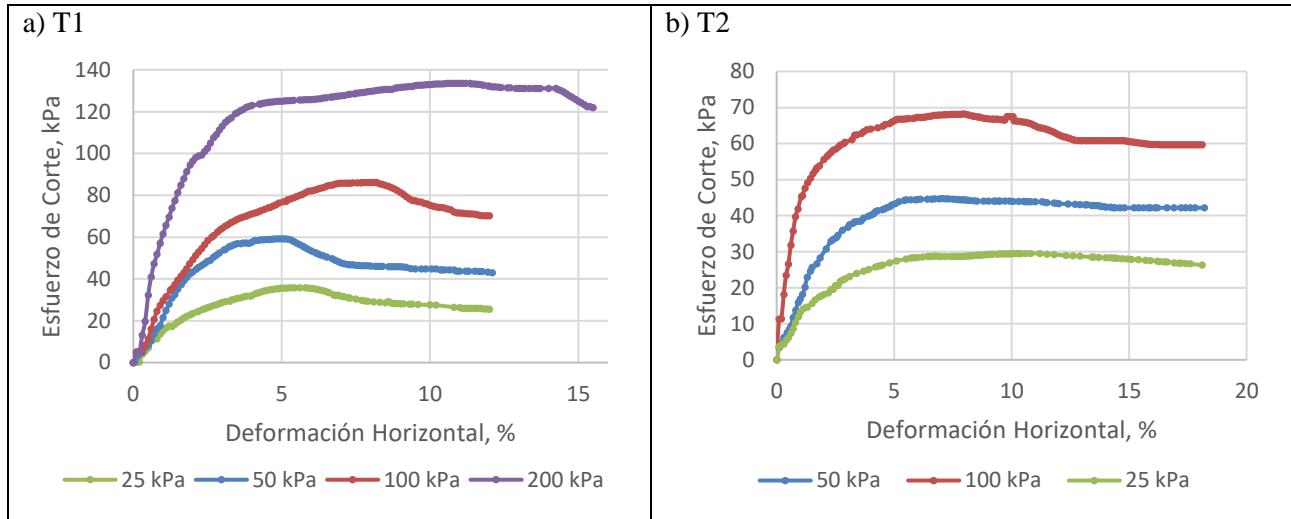
### 5.5.2 Ensayo de Corte Directo

Se realizaron siete ensayos de corte de directo, cuatro muestras en T1 y tres muestras pertenecientes a T2, las cuales fueron extraídas de la base de ambos taludes. Se procedió a cortar y tallar las muestras de forma que calzaran en la caja de corte de 100 mm x 100 mm x 30 mm. Las muestras fueron cortadas cuidadosamente haciendo coincidir la posición horizontal a como se encontraban en terreno. Una vez colocada la muestra en la caja de corte se procedió a su saturación en agua por 24 horas, midiendo el aumento de volumen de la misma. Posteriormente, se cargó la muestra verticalmente y se midió la consolidación de ésta durante 60 minutos. Finalmente, se procedió a desplazar horizontalmente la mitad superior de la caja de corte con respecto a la mitad inferior, bajo una carga normal constante. La velocidad promedio del desplazamiento horizontal fue de 0,13209 mm/min. Durante el ensayo se registraron el desplazamiento horizontal y vertical, además de la carga horizontal y el tiempo. En la Tabla 6 se resumen las propiedades índices de las muestras ensayadas.

**Tabla 6:** Propiedades índice de las muestras ensayadas.

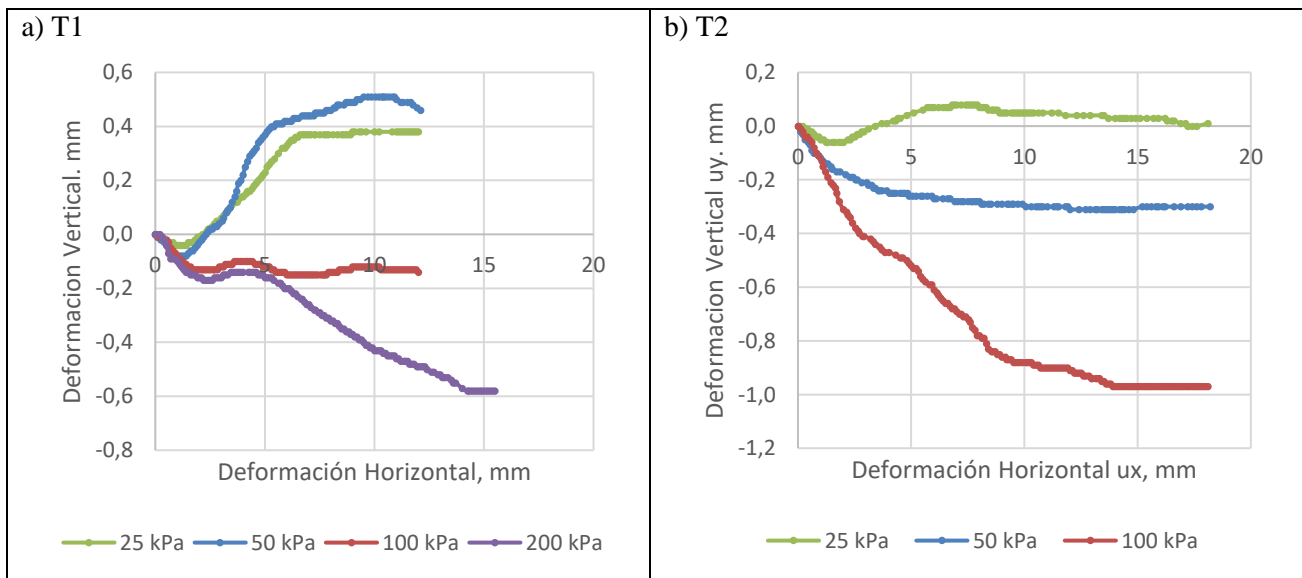
Propiedades índice		T1	T2
Humedad	$\omega$ , %	13,08	9,36
Gravedad Específica	$G_s$	2,60	2,63
Peso Unitario Seco	$\gamma_d$ , kN/m <sup>3</sup>	15,10	12,30
Índice de vacíos	$e$	0,69	1,10
Porosidad	$n$ , %	40,80	52,30
Saturación	$S$ , %	100	100

Para visualizar la relación entre tensión de corte ( $\tau$ ) y el desplazamiento horizontal ( $u_x$ ) se muestra en la Figura 14a los resultados de ensayo para T1, con cuatro tensiones normales constantes  $\sigma_n$  de 25, 50, 100 y 200 kPa y en la Figura 14b, los resultados para T2, con tres tensiones normales constantes  $\sigma_n$  de 25, 50 y 100 kPa. En ambos casos se observa un comportamiento geomecánico similar, con una tensión de corte máxima que disminuye a una tensión de corte crítica constante.



**Figura 14:** Variación de la tensión de corte ( $\tau$ ) versus desplazamiento horizontal ( $u_x$ ) en muestras de T1 y T2.

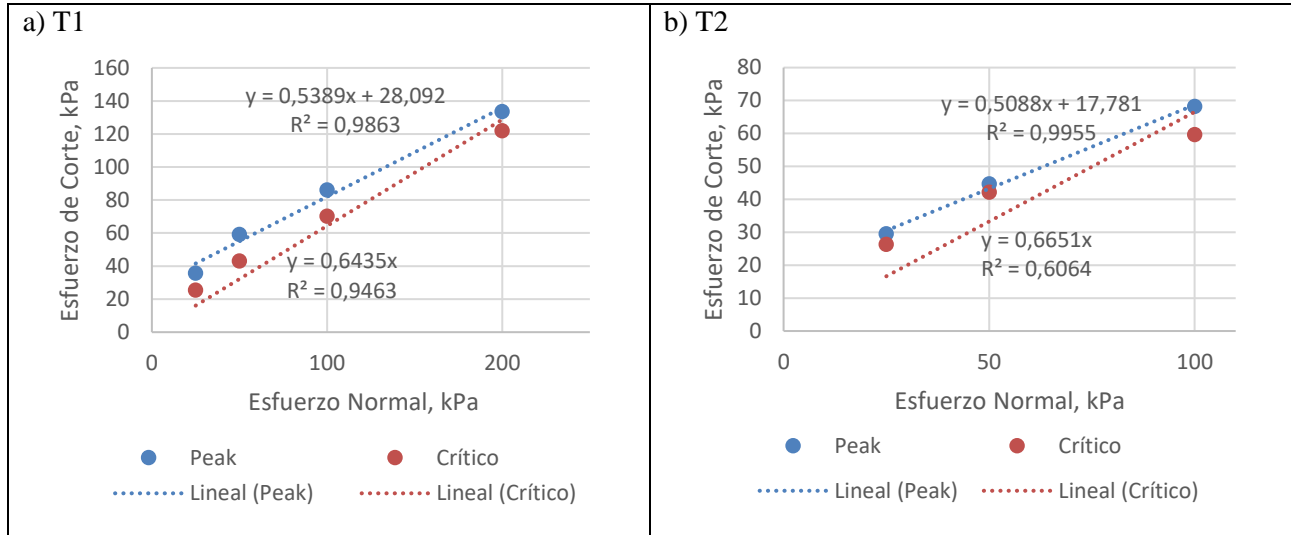
Por otra parte, en las Figuras 15a y 15b se presentan los resultados de desplazamiento vertical ( $u_y$ ) versus desplazamiento horizontal ( $u_x$ ) para las muestras ensayadas de T1 y T2. En general el comportamiento geomecánico para ambos taludes es similar, sin embargo, la muestra de T1 se dilata para una tensión normal de 100 kPa, mientras que T2 se contrae.



**Figura 15:** Desplazamiento vertical ( $u_y$ ) versus desplazamiento horizontal ( $u_x$ ) en muestras de T1 y T2.

Adicionalmente, en las Figuras 16a y 16b se presenta gráficamente un ajuste lineal según el criterio de falla de Coulomb en la gráfica de tensiones de corte máximas ( $\tau_{m\acute{a}x}$ ) y tensiones de corte críticas ( $\tau_{cr\acute{i}tico}$ ), respecto a sus

tensiones normales ( $\sigma_n$ ). A partir de estas graficas se obtuvieron los resultados de cohesión ( $c$ ), ángulo de fricción máximo ( $\varphi_{\text{máx}}$ ) y ángulo de fricción crítico ( $\varphi_{\text{crítico}}$ ) para ambos taludes en estudio. Los resultados para T1 son:  $c=28,1$  kPa;  $\varphi_{\text{máx}}=28,3^\circ$ ;  $\varphi_{\text{crítico}}=32,8^\circ$  y T2 con:  $c=17,8$  kPa;  $\varphi_{\text{máx}}=27,0^\circ$ ;  $\varphi_{\text{crítico}}=31,2^\circ$ .



**Figura 16:** Tensión de corte ( $\tau$ ) versus tensión normal ( $\sigma_n$ ) para muestras de T1 y T2.

En la Tabla 7 se muestra un resumen de los resultados de los ensayos geomecánicos realizados en muestras de T1 y T2. Por una parte, los resultados obtenidos de humedad de saturación ( $\omega_{\text{sat}}$ ) para ambos taludes, podría ser alcanzada producto de intensas precipitaciones, lo que implica la condición más desfavorable para ambos, es decir, que posiblemente fallen. Adicionalmente, los resultados de Gravedad Específica ( $G_s$ ) en ambos taludes en estudio, responden a un suelo común, es decir, mineralógicamente contiene silicatos como cuarzo, feldespato potásico y filosilicatos como caolinita, illita y esmectita.

En cuanto a los valores de peso específico total ( $\gamma_T$ ; Tabla 7) y su relación con el análisis de estabilidad de taludes, se consideró el promedio de los resultados obtenidos en las muestras extraídas en la base de ambos taludes en estudio (muestras A y B; Figura 2), debido a que el  $\gamma_T$  de la muestra C (zona superior de los taludes; Figura 2) es menor por la mayor presencia de materia orgánica, por lo que no influye significativamente en el análisis de estabilidad.

**Tabla 7:** Resumen de Ensayos Geomecánicos.

Parámetro	Símbolo [Ud. Medida]	Muestra	T1	T2
Humedad Natural / Humedad de Saturación	$\omega$ [%] / $\omega_{\text{sat}}$ [%]	A	20,5 / 26,5	23,5 / 41,7
		B	10,6 / 22,3	26,4 / 45,6
		C	10,2 / 44,1	16,4 / 46,3
Suelo bajo la malla No 200	Finos [%]	A	38	32
		B	17	35
Gravedad Específica	$G_s$	A y B	2,60	2,63
Límite Plástico / Límite Líquido	LP [%] / LL [%]	A	NP / 42	NP / 31
		B	NP / 43	NP / 42
Clasificación USCS	Símbolo del Grupo	A y B	SM	SM
Peso Específico Seco / Peso Específico Total	$\gamma_d$ [kN/m <sup>3</sup> ] / $\gamma_T$ [kN/m <sup>3</sup> ]	A	15,1 / 18,2	12,3 / 15,2

		B	16,1 / 17,8	11,7 / 14,8
		C	11,9 / 13,1	11,6 / 13,5
Cohesión / Ángulo de Fricción Máximo	C [kPa] / $\phi_{\text{máx}}$ [°]	A	28,1 / 28,3	17,8 / 27,0
Ángulo de Fricción Crítico	$\phi_{\text{crítico}}$ [°]	A	32,8	31,2

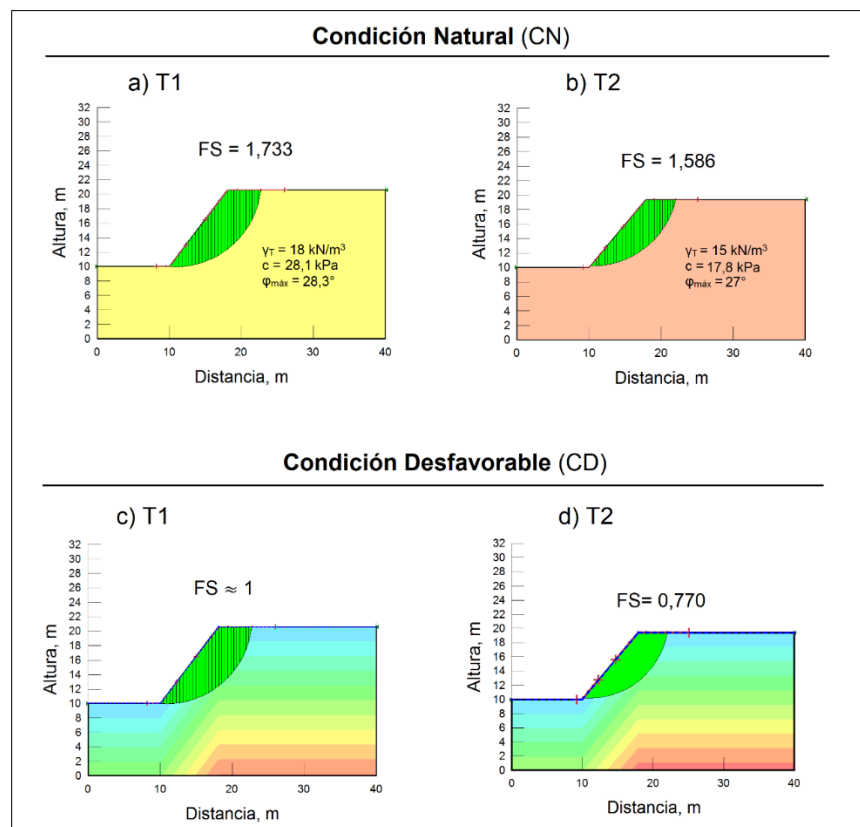
### 5.6 Análisis de estabilidad (Geo – Slope /W, Student Edition)

Para el análisis de estabilidad de ambos taludes en estudio, se consideraron los antecedentes entregados por ASISTECSA (2015a; 2015b), en los cuales se documenta que no hay influencia del nivel freático que aumente la inestabilidad ni influencia de la roca madre que genere un deslizamiento del tipo traslacional.

A partir del procesamiento de los parámetros geomecánicos obtenidos (Tabla 7) en el software Geo – Slope/W, se obtiene el Factor de Seguridad (FS) para ambos taludes en estudio, considerando los siguientes casos:

I) Ambos taludes en su condición natural (CN) se mantienen estables con un  $FS > 1$  (Figura 17a; 17b). Sin embargo, T1 ( $FS=1,733$ ) posee mayor estabilidad que T2 ( $FS=1,568$ ), ya que posiblemente las fuerzas resistentes a que ocurra un deslizamiento en T1 son mayores que para T2.

II) Los taludes en su condición desfavorable (CD) alcanzan su humedad de saturación ( $\omega_{\text{sat}}$ ) considerando un periodo de intensas lluvias. Para el análisis de estabilidad se considera una saturación gradual, desde el nivel del terreno ( $S=100\%$ ) hasta una profundidad de 20 m ( $S=0\%$ ). En consecuencia, T1 ( $FS \approx 1$ ; Figura 17c) se mantiene estable a diferencia de T2 ( $FS=0,770$ ; Figura 17d) que falla desencadenando un deslizamiento.



**Figura 17:** Superficie de rotura de T1 y T2 bajo su Condición Natural (CN; a y b) y su Condición Desfavorable (CD; c y d) en términos de Factor de Seguridad (FS).

## 6. CONCLUSIONES

A partir de la caracterización integral de ambos taludes (T1 y T2), fue posible establecer su susceptibilidad a fallar en función de los factores analizados: agentes externos, estado de meteorización del sustrato (Fluorescencia de Rayos X), caracterización petrográfica, tipo de arcillas (Difracción de Rayos X), ensayos geomecánicos y análisis de estabilidad de taludes (Geo – Slope/W).

En base a los resultados obtenidos y su integración con los análisis de estabilidad de cada talud, se concluye que T2 es susceptible a deslizar cuando la humedad de saturación ( $\omega_{sat}$ ) es alcanzada en un periodo de intensas lluvias, a diferencia de T1 que se mantiene estable en esas condiciones.

Dado que la diferencia de porcentaje de cobertura vegetal en ambos taludes en estudio no es significativa, esta no determina la susceptibilidad a deslizar de estos. Sin embargo, respecto a la influencia del tipo de vegetación en el control de erosión y estabilidad, y dado que ambos poseen vegetación del tipo alóctona, es posible establecer que T1 y T2 se encuentran indebidamente protegidos. En relación al tipo de especies vegetales presentes, se destaca que estas no se adaptan a las condiciones ambientales, incrementando la influencia de la meteorización y jugando un rol ineficiente en su estabilidad. A raíz de lo anterior, se sugiere priorizar el uso de vegetación autóctona en la colonización de taludes, con posibilidad de adaptación y viabilidad con las especies alóctonas presentes, con el fin de controlar los problemas de erosión, y asegurar la estabilidad geotécnica a través del tiempo.

Consistente con la condición de equilibrio límite de ambos taludes, los resultados del grado de meteorización muestran una influencia directa en la estabilidad, ya que T2 posee un estado de meteorización mayor que T1. Adicionalmente, la presencia de esmectita restringida en T2, implica una mayor susceptibilidad a fallar, debido al fácil hinchamiento ante la presencia de agua de este grupo de filosilicatos. En coherencia con lo anterior, T2 falla al alcanzar la humedad de saturación, producto de un periodo de intensas lluvias.

## 7. REFERENCIAS

**Alarcón, F.** (1995). *Evaluación de riesgos naturales en el área metropolitana de Concepción a través del diario El Sur*. Memoria de título de Historia y Geografía. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

**Alonso, E.** (1986). *Influencia del agua en la estabilidad de taludes. Roturas en rocas. Casos reales*. Riesgos Naturales en Ingeniería Civil. Universidad Politécnica Cataluña, Barcelona, pp. 45 – 98.

**Aristizábal, E., Roser, B. and Yokota, S.** (2009). Patrones e índices de meteorización química de los depósitos de vertiente y rocas fuentes en el Valle de Aburrá. *Boletín de ciencias de la tierra*, Vol. 25, 2009, pp. 27-42.

**ASISTECSA** (2015a). Memoria Análisis de estabilidad de talud, sector Chaimavida, Dm 52.100 a Dm 52.420 aproximado. Concepción: Rodrigo Chávez Salamanca, pp. 1 – 9.

**ASISTECSA** (2015b). Memoria Análisis de estabilidad de talud, sector San Valentín, Dm 0+000 a Dm 0+220 aproximado, lado derecho con banquetas. Concepción: Rodrigo Chávez Salamanca, pp. 1 – 43.

**ASTM D 2487** (2011). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), West Conshohocken, United States, ASTM international.

**ASTM D 3080** (2011). Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained. West Conshohocken, United States, ASTM international.

**Blight, G.** (1997). *Mechanics of residual soils*. Balkema/Rotterdam.

- Carrasco, P., Millán, J., and Peña, L.** (1993). Suelos de la cuenca del Río Biobío: características y problemas de uso. *Serie Análisis Territorial 13*. Centro de Ciencias Ambientales EULA, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- Castro, A. and Carramiñana, J.** (2010). *Técnicas de protección de taludes viales utilizadas en la zona central de Chile*. Memoria de título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Chesworth, W.** (1979). The major elements geochemistry and the mineralogical evolution of granitic rocks during weathering. *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 11, 1979, pp. 305 – 313.
- Chesworth, W.** (2000). La regla de fases en ciencia del suelo. *Edafología*, Vol. 7, 2000, No. 1, pp. 107-119.
- Corominas, J. and Alonso, E.** (1984). Inestabilidad de laderas en el Pirineo Catalán: Tipología y causas. *Jornadas sobre Inestabilidad de Laderas en el Pirineo*. Universidad Politécnica de Barcelona: pp. C – 1 a C – 53.
- Delgado, J. and Godoy, R.** (2009). Elaboración de Cartografía Física Elemental. España: *Open Courseware [OCW], Universidad de Málaga [UMA]*. <https://goo.gl/MuXgwh>
- Devynck, J.** (1970): *Contribución al estudio de la circulación atmosférica de Chile y el clima de la región del Biobío*. Universidad de Concepción. Departamento de Geofísica. Concepción, Chile.
- Dirección de Viabilidad** (2015). *Manual de Carreteras: Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control*. Vol. 8, Capítulo 8.100, Chile.
- Dirección Meteorológica de Chile: Departamento de Meteorología y Climatología** (2001). Climatología Regional, p. 28. Recuperado de [http://164.77.222.61/climatologia/publicaciones/Climatologia\\_regional.pdf](http://164.77.222.61/climatologia/publicaciones/Climatologia_regional.pdf)
- División Político Administrativa y Censal** (2007). Región del Biobío. Chile: *Instituto Nacional de Estadísticas [INE]*. Recuperado el 03 de febrero de 2017, de <https://goo.gl/jVTXix>
- Fedo, C., Nesbitt, H. and Young, G.** (1995). Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*. Vol. 23, No. 10, October 1995, pp. 921 – 924.
- Ferraris, F.** (1981). Hoja Los Angeles-Angol, Mapas geológicos preliminares de Chile, escala 1:250.000. Instituto de Investigaciones Geológicas de Chile (inédito). Santiago.
- Ferrer, M.** (1987). Flujos y Avalanchas. *Riesgos Geológicos: Serie Geología Ambiental*. Instituto Geológico Minero, pp. 175 – 192. Madrid.
- Fookes, P.** (1997). *Tropical residual soils*. London: The Geological Society.
- Gajardo, A.** (1981). Hoja Concepción – Chillan, Mapas geológicos preliminares de Chile, escala 1:250.000, Institutos de Investigaciones Geológicas, Santiago.
- García Yague, A.** (1967). Contribución para la clasificación de los movimientos de terreno. *Ministerio de Obras Públicas: Servicio Geológico*, Boletín, No. 26, p. 21. Madrid.
- Geo-Slope International Ltd.** (2016). Solutions: Reinforced walls and slopes. Canada: *Geo – Slope*. Recuperado el 03 de febrero de 2017, de <https://www.geo-slope.com/>

- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., and Oteo, C.** (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Prentice Hall.
- Hauser, A.** (1993). Remociones en masa en Chile. *Servicio Nacional de Geología y Minería*, Boletín, No. 45, 1993, p. 75. Santiago.
- Hauser, A.** (2000). Remociones en masa en Chile. *Servicio Nacional de Geología y Minería*, Boletín, No. 59, Versión Actualizada 2000, p. 89. Santiago.
- Hervé, F.** (1977). Petrology of the Crystalline Basement of the Nahuelbuta Mountains, South Central Chile. *In Comparative studies on the geology of the Circum-Pacific Orogenic Belt in Japan and Chile: T. Ishikawa and L. Aguirre. Japan Society for the promotion of Science*, Tokyo. pp. 1 – 51.
- Hervé, F., Munizaga, F., Montavani, M. and Hervé, M.** (1976). Edades Rb-Sr neopaleozoicas del basamento cristalino de la Cordillera de Nahuelbuta. *Actas del I Congreso Geológico Chileno*, Santiago, Chile: Universidad de Chile, agosto 1971, pp. F19 – F26.
- Hervé, F., Munizaga, F., Parada, M-A., Brook, M., Pankhurst, R.J., Snelling, N.J., Drake, R.** (1988). Granitoids of the Coast Range of central Chile: Geochronology and Geologic setting. *Journal of South American Earth Sciences*, Vol. 1, pp. 185 – 194.
- Highway Research Borad** (1958). Landslides and Engineering Practice. *Special Report*, No.29, p. 222. Washington D.C.
- Hutchinson, J.N.** (1968). Mass movements. *In The Encyclopedia of Geomorphology. America Bulletin*, No. 86, pp. 128 – 140.
- Iturriaga, L. and De la Harpe, J.** (2012). Línea de base: flora, vegetación y fauna vertebrada del humedal de Mantagua: Región de Valparaíso. Valparaíso, p. 8.
- Janbu, N.** (1954). Applications of Composite Slip Surfaces for Stability Analysis. *Proceedings of the European Conference on the Stability of Earth Slopes, Stockholm*, Vol. 3, pp. 39 – 43.
- López, P.** (2015). Análisis de umbrales de precipitación de procesos de remoción en masa en laderas urbanizadas de la costa de Chile centro-sur. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*. Vol. 24, No. 2, pp. 93 – 112, DOI: 10.15446/rcdg.v24n2.50212
- López, P. and Garrido, B.** (2015). Metodología aplicable a la susceptibilidad de procesos de remoción en masa en ambientes costeros urbanizados de Chile centro – sur. *XV Conferencia Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica*. Días 9,10 y 11 de septiembre de 2015, pp. 469 – 479. Valparaíso, Chile.
- Macau, F.** (1963). Previsión de los movimientos de terreno. *Ministerio de Obras Públicas, Servicio Geológico, Boletín*, No. 16, pp. 133 – 225. Madrid.
- Mardones, M. and Rojas, J.** (2012). Procesos de remoción en masa inducidos por el terremoto del 27F de 2010 en la franja costera de la Región del Biobío, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, Vol. 53, pp. 57-74.
- Matteucci, S. and Colma, A.** (1982). *Metodología para el estudio de la vegetación*. Monografía No 22. p. 42, Washington, D.C., <https://goo.gl/NecRWj>

- Moon, V. and Jayawardane, J.** (2004). Geomechanical and geochemical changes during early stages of weathering of Karamu Basalt, New Zealand. *Engineering Geology*, Vol. 74, pp. 57-72.
- Moore, D. M. and Reynolds, R. C., Jr.** (1997). *X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals*. New York: Oxford University Press.
- Müller, I.** (1979). Josef Stini: Contributions to engineering geology and slope movements investigations: Rockslides and Avalanches. *Engineering Sites, Elsevier*, Vol. 2, pp. 95 – 106.
- Naranjo, J.A., Clavero, J., Hauser, A. and Ramírez, P.** (2005). Informe geológico sobre las remociones en masa causadas por las lluvias torrenciales de los días 26 y 27 de junio 2005 en concepción, VIII región. *Servicio Nacional de Geología y Minería (Inédito)*, Santiago, Chile, pp. 1 – 24.
- Nesbitt, H. and Young, G.** (1984). Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochimica et Cosmochimica*, Vol. 48, pp. 1523 – 1534.
- Nesbitt, H. and Young, G.** (1989). Formation and diagenesis of weathering profiles. *Journal Geology*. Vol. 97, pp. 129 – 147.
- Norma Chilena NCh-1515** (1997). Mecánica de suelos - Determinación de la humedad. Instituto Nacional de Normalización. Santiago, Chile.
- Norma Chilena NCh-1516** (1979). Mecánica de Suelos - Determinación de la densidad en el terreno - Método del Cono de Arena, Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile.
- Norma Chilena NCh-1517/1** (1979). Mecánica de suelos - Límites de consistencia - Parte 1: Determinación del límite líquido. Instituto Nacional de Normalización. Santiago, Chile.
- Norma Chilena NCh-1517/2** (1979). Mecánica de suelos - Límites de consistencia - Parte 2: Determinación del límite plástico. Instituto Nacional de Normalización. Santiago, Chile.
- Norma Chilena NCh-1532** (1980). Mecánica de suelos - Determinación de la densidad de partículas sólidas. Instituto Nacional de Normalización. Santiago, Chile.
- Sanhueza, C. and Rodríguez, L.** (2013). Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales. *Revista de Construcción*, pp. 17 – 29.
- Servicio Nacional de Geología y Minería [SERNAGEOMIN]** (2003). Mapa Geológico de Chile: Versión Digital No. 4, CD room, versión 1.0. Santiago, Chile.
- Sistema Integrado de Información Territorial [SIIT]** (2007). Clima y Vegetación Región del Biobío. Chile: *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile / BCN*. Recuperado el 3 de mayo de 2017. <https://goo.gl/pNgcDo>
- Skempton, A. W. and Hutchinson, H.** (1969). Stability of natural slopes and embankment foundations. *International Conference of Soil Mechanics and Foundation of Engineering*, No. 7, State of the Art Report, pp. 291 – 340. México.
- Smith-Ramírez, C.** (2004). The Chilean Coastal Range: a vanishing center of biodiversity and endemism in South American temperate rainforests. *Biodiversity and Conservation*. Vol. 13, pp. 373 – 374.

- Solé, A., Cantón, Y., Lázaro, R. and Puigdefábregas, J.** (2009). Meteorización y erosión en el sub-desierto de Tabernas, Almería. *Cuadernos de Investigación Geográfica*. Vol. 1, No. 35, pp. 141 – 163.
- Streckeisen, A.** (1976). To each plutonic Rock its proper name. *Earth Science Reviews*. Vol. 12, pp. 1- 33. Amsterdam, London, New York.
- Suárez, J.** (1998). *Deslizamiento y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales*. Bucaramanga: Ingeniería de Suelos Ltda.
- Terzaghi, K. and Peck, R.** (1973). Empuje de tierras y estabilidad de taludes. *Mecánica de suelos en la ingeniería práctica*. Ministerio de Obras Públicas, Servicio de Geología, Capítulo 8, p. 681. Madrid.
- Varnes, D. J.** (1978). Slope movement: types and processes. *In Landslides; analysis and control* (Schuster L.L.; Krinszks, R.J.; Editors). Transportation Research Board, National Research Council (Special Report), No. 176, pp. 11 – 33. Washington, D.C.
- Vásquez, P.** (2001). *Petrología y Geotermobarometría del Basamento Metamórfico de la Cordillera de la Costa entre los 36°30' y 38°00'S*. Memoria de título de Geólogo. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- Villalobos, F.** (2014). *Mecánica de Suelos*. Concepción: UCSC y LGM
- Wesley, L.** (2009). Behaviour and geotechnical properties of residual. *Obras y Proyectos*. Vol. 6, pp. 5 – 10.
- Wesley, L.** (2011). Stability of slopes in residual soils. *Obras y Proyectos*. Vol. 10, pp. 47 – 61.
- Wolodarsky-Franke, A. and Díaz, S.** (2011). *Cordillera de Nahuelbuta: Reserva Mundial de Biodiversidad*. Valdivia, Chile: World Wide Fund For Nature [WWF].
- Zarza, A.** (2010). Petrología sedimentaria. Notas de teoría. 2. Nociones básicas de geoquímica y físico-química en ambientes sedimentarios: Propiedades físico-químicas del agua y geoquímica de las rocas sedimentarias. *Reduca (Geología)*. Serie petrología sedimentaria. Vol. 2, No. 3, pp. 8 – 17.